

# 全身運動による反力操作に基づいたヒューマノイドロボットの高機動化制御

## Mobility Enhancement Control of Humanoid Robot based on Reaction Force Manipulation via Whole Body Motion

杉原知道 指導教官 中村仁彦教授  
Tomomichi Sugihara (Professor Yoshihiko Nakamura)

Keywords: Humanoid robot, Motion control, Reaction force manipulation

### 1. 緒言

ヒューマノイドが、人々の身近な環境で様々なニーズに応えられるロボットとして盛んに研究されている背景には、人間に合わせて作られたインフラ内での作業に適した形態を持つということも一因としてあるが、それ以上に、人と同等以上の運動能力を持ち得るという期待が強くある。しかし実情は、多様性に富む実環境に未だ太刀打ちできず、解決すべき課題が山積している。

力学系としてのヒューマノイドは、20~50の関節から成る大自由度と、慣性系に固定されないことに因る非駆動座標の存在に特徴づけられる強非線形系であり、制御問題には閉じた解が存在しない。現在の主流的成果である、環境をモデルから排除することで問題を簡略化する方法 [1, 2, 3] は、環境の変動に対し脆弱である。離散化された系のダイナミクスが内包する反復性に基づく方法 [4, 5] は、周期的歩行に適用が限定されている。神経系を模擬した制御器と身体との結合により環境の変動への頑健な振る舞いを期待した方法 [6] も提案されているが、制御器の設計方法が自明でない。プラントのダイナミクスの本質的理解に裏打ちされた戦略が最も有望であると言えるが、しかしこのような立場からの研究 [7, 8, 9, 10, 11, 12] では、モデルの複雑さや力学的拘束条件が理論、実装双方の面で障害となり、決定打の登場を阻んできた。

操縦者からの指令に俊敏に応答し、外乱を柔軟に吸収する能力を備え、環境内を自在に動く高い機動性を実現するためには、大自由度を破綻なく管理しつつ、関節に働く内力を環境に作用させ、その反作用として生じる外力を巧みに操作することが要求される。本研究の目的は、このような困難な要求を克服し、全身を用いた外力操作によって高機動性を実現し得る制御系の設計方法を、可能な限り一般的な形で示すことである。

### 2. 脚型ロボットの重心ヤコビアン

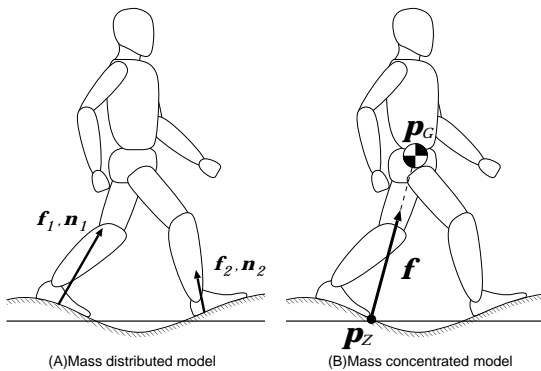


図1 A humanoid model and external force

Fig.1(A) に示すようなヒューマノイドの一般化運動方

程式は次式のように表される [7].

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_0 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} + \sum_k \begin{bmatrix} K_{k11} & K_{k12} \\ K_{k21} & K_{k22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_k \\ n_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし  $q_0$  は基底リンク (任意の 1 リンク) の 6 自由度、 $H_{ij}$  は慣性行列、 $b_i$  はバイアス力、 $\tau$  は関節トルク、 $f_k$  および  $n_k$  は  $k$  番目接触点において作用する外力およびモーメント、 $K_{ik}$  は外力を一般化力に変換する行列である。上半分は基底リンクが慣性系に固定されていないことを表し、非ホロノミック拘束条件となる。ここから並進 3 自由度に対応する部分を抜き出すと次式ようになる。

$$m(\ddot{p}_G + g) = f \quad (2)$$

ただし  $m$  はロボットの質量、 $p_G$  は重心、 $g$  は重力加速度ベクトル、 $f$  は外力の総和である。これは Fig.1(B) のような単純なモデルを想定したのと同義であり、重心という幾何学的パラメータによって系の力学を近似できることを意味する。すなわち重心加速度を何らかの方法で操作できれば、等価的に  $f$  を操作できると言える。

本研究では、全関節運動と重心運動とを関係づけるヤコビ行列 (重心ヤコビアン) の一般的な形を示し、その高速な計算法を開発した。一例として、支持脚足先と地面との面接地状態が維持される場合は次のようになる。

$$J_G = R_0 \{ J_G - {}^0 J_F + ({}^0 p_G - {}^0 p_F) \times {}^0 J_{\omega_F} \} \quad (3)$$

ただし  $p_0, R_0, \omega_0$  はそれぞれ基底リンクの位置、姿勢、角速度、 ${}^0 p_F, {}^0 \omega_F$  はそれぞれ基底リンクから見た支持脚足先の相対位置および角速度、 ${}^0 J_F, {}^0 J_{\omega_F}$  はそれぞれ足先の相対並進速度および角速度のヤコビアンである。これによって重心と全身運動は次のように関係づけられる。

$$\dot{p}_G = J_G \dot{\theta} \quad (4)$$

この式に基づき、所望の外力を等価な全身運動に変換できる。詳細は次章以降で述べる。

### 3. 時間二重外乱吸収法による安定化制御

本章では、既知の環境下においてオフライン軌道計画と組み合わせた運動制御法について述べる。目的とする運動の幾何パターンとそれに対応する外力パターンを、逆力学解析などによって事前に計画することが高度なタスク遂行に有効だが、実際の運動においては、ロボットや環境のモデル化誤差など外乱の影響によって計画軌道からのずれが生じる。Fig.3 に示すように、このずれを補償する幾何パターンの再現と、支持脚足裏の地面からの剥離を避け転倒を防止する力パターンの再現による安定化制御が必須である。この二者が競合することは頻繁に起こるが、力パターンの再現における時間的条件が非常に厳しいのに対し、幾何パターンの再現は多少の時間経

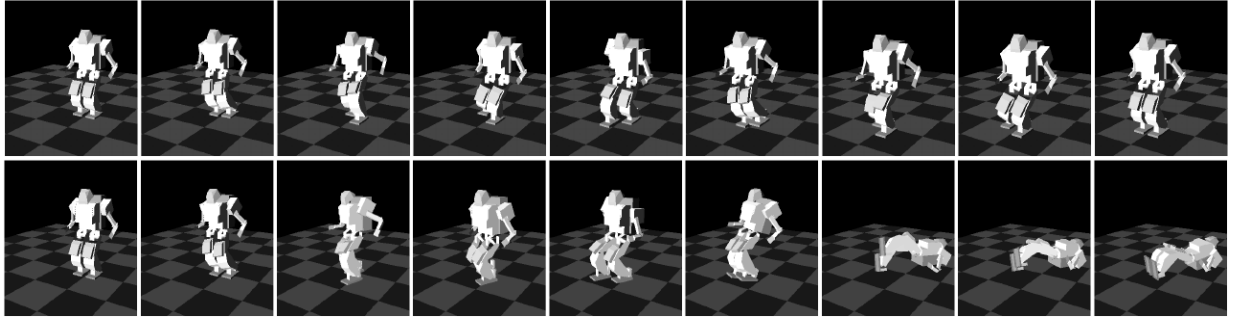


図2 Walking motion with/without stabilization via dual term absorption of disturbance

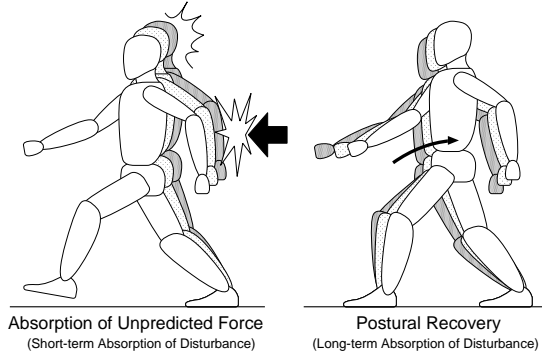


図3 Two basic schemes for stabilization

過を容認できる. これに基づき, 多重な時間枠の中でこの競合する事項を満足する時間二重外乱吸収法を提案する.

Eq.(1) において, 外力の作用点である ZMP[1]  $\mathbf{p}_Z \equiv [x_Z \ y_Z \ z_Z]^T$  に着目すれば次式を得る.

$$\ddot{w}_G = \omega^2(w_G - w_Z) \quad (w = x \text{ or } y) \quad (5)$$

$$\ddot{z}_G = f_z/m - g \quad (6)$$

$$\omega^2 \equiv (\ddot{z}_G + g)/(z_G - z_Z) \quad (7)$$

ただし  $f_z$  は垂直床反力,  $g$  は重力加速度であり, 重心まわりのモーメントは無視した.  $z_Z$  は床面の高さであり既知である. 従って, ZMP および垂直床反力を入力とすれば重心を制御できる.

全身運動を記述する幾何パターン (関節角  $\boldsymbol{\theta}$ , 重心  $\mathbf{p}_G$ ), および力パターン (ZMP  $\mathbf{p}_Z$ , 垂直床反力  $f_z$ ) の指令値  ${}^{cmd}\boldsymbol{\theta}$ ,  ${}^{cmd}\mathbf{p}_G$ ,  ${}^{cmd}\mathbf{p}_Z$ ,  ${}^{cmd}f_z$  が, 理想的に外乱のない条件下で Eq.(5)(6) を満足するよう与える. すなわち

$${}^{cmd}\ddot{w}_G = {}^{cmd}\omega^2({}^{cmd}w_G - {}^{cmd}w_Z) \quad (8)$$

$${}^{cmd}\ddot{z}_G = {}^{cmd}f_z/m - g \quad (9)$$

$${}^{cmd}\omega^2 \equiv {}^{cmd}f_z/\{m({}^{cmd}z_G - {}^{cmd}z_Z)\} \quad (10)$$

また外乱の影響によって重心に生じるずれを  $\Delta\mathbf{p}_G = [\Delta x_G \ \Delta y_G \ \Delta z_G]^T$  とする. すなわち

$$\mathbf{p}_G = {}^{cmd}\mathbf{p}_G + \Delta\mathbf{p}_G \quad (11)$$

ここで, 入力  $\mathbf{p}_Z$  および  $f_z$  を仮に次式で決定する.

$$w_Z = {}^{cmd}w_Z + P_w\Delta w_G + D_w\Delta\dot{w}_G \quad (12)$$

$$f_z = {}^{cmd}f_z - P_z\Delta z_G - D_z\Delta\dot{z}_G \quad (13)$$

これらを Eq.(5)(6) に代入すると,

$$\ddot{w}_G = \omega^2(w_G - {}^{cmd}w_Z) - \omega^2(P_w\Delta w_G - D_w\Delta\dot{w}_G) \quad (14)$$

$$\ddot{z}_G = ({}^{cmd}f_z/m - g) - (P_z\Delta z_G + D_z\Delta\dot{z}_G)/m \quad (15)$$

これは, 外力を力パターン指令値の近傍に発生させていると解釈できる. 更に Eq.(11) (8)(9) より, Eq.(14)(15) は

$$\Delta\ddot{w}_G + \omega^2 D_w\Delta\dot{w}_G + \omega^2(P_w - 1)\Delta w_G = 0 \quad (16)$$

$$\Delta\ddot{z}_G + D_z\Delta\dot{z}_G/m + (P_z - 1)\Delta z_G/m = 0 \quad (17)$$

実際には  $\omega^2$  は変動するため考察は簡単ではないが, その変動が  $x_G, y_G$  と比較して十分に緩慢ならば, Eq.(16)(17) より幾何パターン  $\Delta\mathbf{p}_G$  は次の条件の下で  $\mathbf{0}$  に収束する.

$$P_* > 1, \quad D_* > 0 \quad (* = x, y, z) \quad (18)$$

また, ロボットが環境に固着していないことから,  $\mathbf{p}_Z$  が支持領域の内部に存在し,  $f_z$  は正でなければならない. Eq.(12)(13) で決めた力パターンがこれを満足しない場合, 条件を満たしかつこれに最も近い値で置き換える. このように, ZMP および垂直床反力を操作量と見なすことで, 力学的拘束条件を直截考慮することが可能になる.

Eq.(14)(15) の重心加速度を実現し, かつなるべく計画運動に近い全身運動の目標値  ${}^{ref}\boldsymbol{\theta}$  を求める. まず Eq.(14)(15) を一階積分して Eq.(4) に代入し, 他の拘束条件 (足先の運動など) と併せて次式で与える.

$$\mathbf{J}_U {}^{ref}\dot{\boldsymbol{\theta}} = {}^{ref}\dot{\mathbf{p}}_U \quad (19)$$

$\mathbf{J}_U$  の重み付き一般化逆行列  $\mathbf{J}_{UW}^\#$  を用いれば,

$${}^{ref}\dot{\boldsymbol{\theta}} = {}^{cmd}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{J}_{UW}^\# (\mathbf{J}_U {}^{cmd}\dot{\boldsymbol{\theta}} - {}^{ref}\dot{\mathbf{p}}_U) \quad (20)$$

以上の方法を用いて歩行運動をシミュレートした. 仮想的な外乱として衝撃を数回与えた. 提案した制御法を併用したときの結果を Fig.3 の上段に, 併用しなかったときの結果を下段にそれぞれ示す. 制御によって, 転倒を防ぎ計画パターンに収束していることが確認できる.

#### 4. 倒立振子モデル型 ZMP 操作法

本章では, 環境が予測不可能な要素に富み, 物体との衝突や動作指令の急変更等の咄嗟の状況への対応が要求される場合に有効な運動制御法を示す.

Fig.1(B) のモデルは, ZMP を支持点とする倒立振子とのダイナミクスの類似性を示唆しており, 以下の方法で倒立振子と同様にロボットの重心を制御することが可能である. まず, Eq.(5) を 1 階微分すると次式を得る.

$$\dot{v}_{Gw} = \omega^2(v_{Gw} - v_{Zw}) \quad (21)$$

ただし  $v_{Gw} \equiv \dot{w}_G, v_{Zw} \equiv \dot{w}_Z$  である. ここでは簡単のため, 操作量  $v_{Zw}$  決定に PID 制御を用いる.

$$V_{Zw} = (P_w + I_w/s + D_w s)({}^{ref}V_{Gw} - V_{Gw}) \quad (22)$$

ただし  $V_*$  は  $v_*$  のラプラス変換,  $P_x, I_x, D_x$  はそれぞれ比例, 積分, 微分ゲインである. このとき Eq.(21) は,

$$V_{Gw} = \frac{-\omega^2(D_w s^2 + P_w s + I_w)}{s^3 - \omega^2 D_w s^2 - \omega^2(P_w + 1)s - \omega^2 I_w} {}^{ref}V_{Gw} \quad (23)$$

前章と同様に,  $\omega^2$  の変動が  $x_G, y_G$  と比較して十分緩慢でほぼ定数と見なせるならば, Hurwitz の安定判別法より  $P_w, I_w, D_w$  が全て負であり,  $\omega^2 D_w(P_w + 1) + I_w < 0$  のとき安定である. また  ${}^{ref}v_{Gw} = const.$  とすると,  $v_{Gw}$  は  ${}^{ref}v_{Gw}$  に収束する. Eq.(22) を積分し Eq.(5) に代入すれば等価重心加速度が求まる. この際も, ZMP と垂直床反力に関する条件が満足されなければ値を修正する.

この重心加速度を実現する  ${}^{ref}\dot{\theta}$  を, ノルム最小化によって求めることにする. 前章と同様に, 拘束条件として Eq.(19) を与え,  $J_{UW}^\#$  によってこれを解けば,

$${}^{ref}\dot{\theta} = J_{UW}^\# {}^{ref}\dot{p}_U \quad (24)$$

以上の方法を用いて片足昇降運動をシミュレートした. 適当に与えた踏み換え指令にも即応的な反応を示した. 運動中, 横方向に強い衝撃を与えたところ, 衝撃を吸収する踏み出し運動が自然に発生した. また重心に一定の目標速度を与え適当に足を踏み換えさせることで, ほぼ定常な歩行が得られた. 結果をそれぞれ Fig.4,5 に示す.

## 5. インピーダンス切り替えによる接地操作

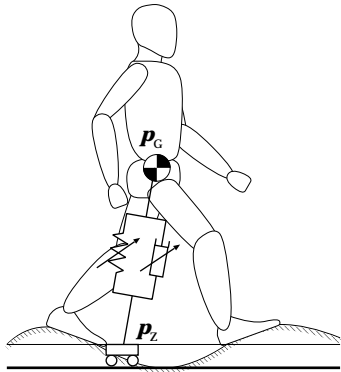


図6 An inverted pendulum model with impedance

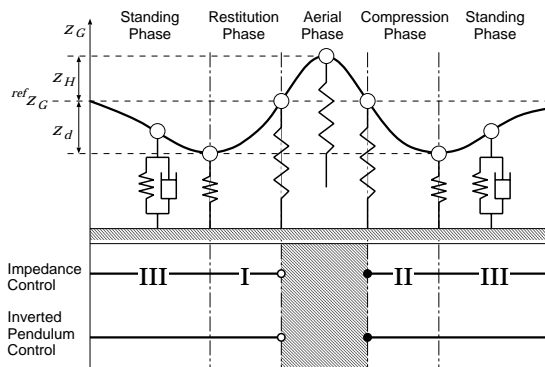


図7 Contact phase and control scheme

前章で示した方法は, 重心の水平方向運動に焦点を当てたものである. 本章では鉛直方向の運動に着目し, 跳躍などの無接地状態を含む運動も扱える制御法を提案する.

$f_z$  を次のように決定し, 重心と外力作用点との間に仮想的なインピーダンス特性を与える.

$${}^{ref}f_z = m\{K_{Pz}({}^{ref}z_G - z_G) + K_{Dz}({}^{ref}\dot{z}_G - \dot{z}_G) + g\} \quad (25)$$

これを Eq.(6) に代入すれば,

$$\ddot{z}_G = K_{Pz}({}^{ref}z_G - z_G) + K_{Dz}({}^{ref}\dot{z}_G - \dot{z}_G) \quad (26)$$

脚型ロボットにおいて, 着床時の衝撃を緩和するためにインピーダンス制御を応用する例は幾つか提案されている [13]. 本研究ではインピーダンスが系に付与する半受動性によって, Fig.7 に示すように離床・着床を遷移させることを考える. 力学的エネルギー保存則に基づけば,

$$I) K_{Dz} = 0, K_{Pz} = 2gz_H/z_d^2 \quad (\text{離床のための加速}) \quad (27)$$

$$II) K_{Dz} = 0, K_{Pz} = (\dot{z}_{G-}/z_d)^2 \quad (\text{着床時衝撃吸収}) \quad (28)$$

$$III) K_{Dz}^2 - 4K_{Pz} > 0 \quad (\text{立脚状態維持}) \quad (29)$$

である. ただし  $z_H$  は予定跳躍高さ,  $z_d$  は最大屈み込み量,  $\dot{z}_{G-}$  は着床時の落下早さである. 換言すればこれは, インピーダンスの切り替えによって系の鉛直方向の力学的エネルギーを操作していることになる.

以上の方法に基づいてシミュレートした跳躍動作を Fig.8 に示す.

## 6. 高機動小型ヒューマノイドシステム

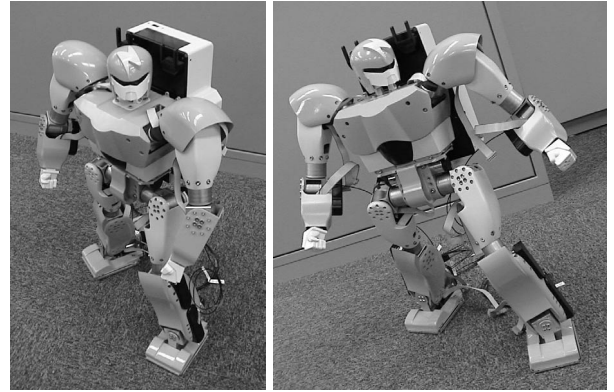


図9 External view of UT- $\mu$ : mighty

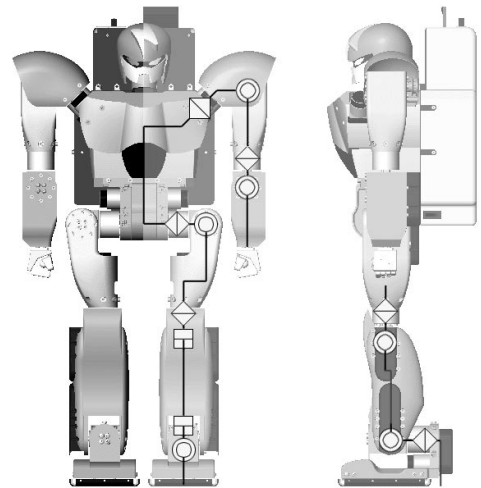


図10 Joint assignment of UT- $\mu$ : mighty

運動制御の実験を円滑にし, かつ人間と同程度のサイズを持つヒューマノイドに有意な知見をフィードバックできる高機能な小型ヒューマノイドロボット UT- $\mu$ :mighty を開発した. Fig.9 に外観を示す. 全高約 58cm, 重量約 7kg であり, 関節数は左右共に腕部 4, 脚部 6 である. 全関節アクチュエータにコアレス DC モータ, 減速器にハー

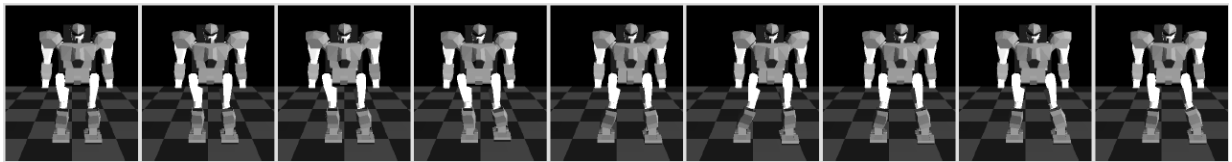


図4 Stepping motion with an impulsive disturbance

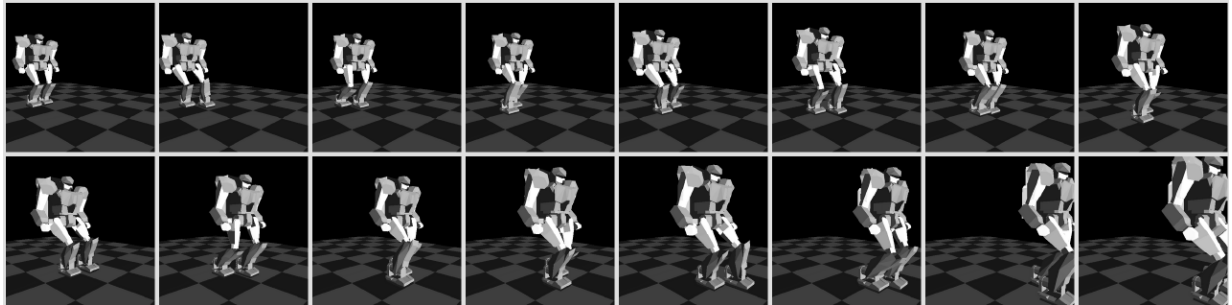


図5 Walking motion by inverted pendulum model based ZMP manipulation

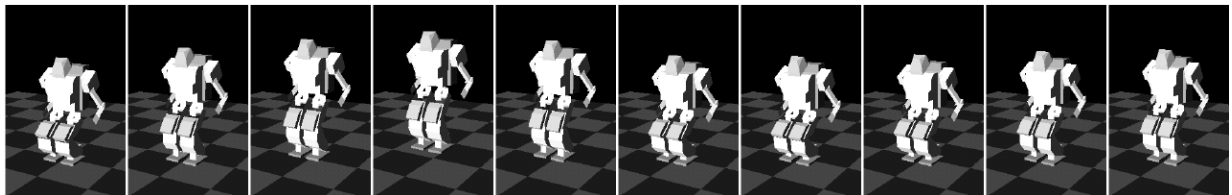


図8 Jumping motion by inverted pendulum model with impedance

モニックドライブを採用し、高い制御精度とトルク出力を実現した。主構造材にはマグネシウム合金を用い、曲面を多用した鋳造による筒型の薄肉外殻で各々の関節を連結することで、重量増加の抑制と高剛性化を実現した。

Fig.10 に示すような関節配置によって、可動範囲を拡大し、直立時に特異姿勢となることを回避した。また各関節は直交二軸ユニットとしてモジュール化され、部品点数の削減とメンテナンス性の向上などの効果を得ている。

## 7. 結言

ヒューマノイドロボットの運動制御において、操縦者からの指令への俊敏な応答能力、外乱の柔軟な吸収能力などを備えた高い機動性の実現を目指し、全身の巧みな協調によって反力を操作する方法と、それに基づく制御系の設計法を提案した。具体的な成果は次の3点である。

1. 複雑な運動方程式から重心と外力との関係を抽出した本質的ダイナミクスに着目し、幾何学的パラメータである重心によって力学を近似できることを示した。これは制御器設計のための見通しを良くし、同時に実装上の問題である計算コストを大幅に低減する。
2. 上記のモデルにおいて外力の作用点であるZMPと垂直反力を操作量と見なすことで、系に課せられる力学的拘束条件を直截的に考慮することを可能とした。
3. オフライン計算によって求めた計画軌道の近傍で運動を安定化し高度なタスクを遂行する制御法と、倒立振り子モデルおよび仮想インピーダンスに基づいて頑健な振る舞いを実現するオンライン制御法を開発し、各々の有効性をシミュレーションで確認した。

更なる機動性拡大のための課題として、重心制御と連動した精密な運足、上下肢を用いた環境との積極的な相互作用を要求する運動と、それに伴う不静定問題の解決などが挙げられる。

## 参考文献

- [1] M. Vukobratović and J. Stepanenko. On the Stability of Anthropomorphic Systems. *Mathematical Biosciences*, Vol. 15, No. 1, pp. 1-37, 1972.
- [2] 山口, 高西, 加藤. 上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの開発. *日本ロボット学会誌*, Vol. 11, No. 4, pp. 581-586, 1993.
- [3] 長阪, 稲葉, 井上. 動力学的動作変換フィルタ群を用いた人間型ロボットの全身行動設計. 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1999.
- [4] 下山. 竹馬形2足歩行ロボットの動的歩行. *日本機械学会論文集 (C編)*, Vol. 48, No. 433, pp. 1445-1455, 1982.
- [5] T. McGeer. Passive Dynamic Walking. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 62-82, 1990.
- [6] 宮腰ら. 神経振動子を用いた三次元2足踏みシミュレーション—ヒューマノイドの実世界内行動を目指して—. *日本ロボット学会誌*, Vol. 18, No. 1, pp. 87-93, 2000.
- [7] 藤本, 河村. 2足ロボットの床反力を考慮した安定化制御と自律的歩行パターン生成システムの提案. *電気学会産業計測制御研究会, IIC-96-20*, pp. 103-110, 1996.
- [8] J. Pratt, P. Dilworth, and G. Pratt. Virtual Model Control of a Bipedal Walking Robot. In *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 193-198, 1997.
- [9] K. Hirai et al. The Development of Honda Humanoid Robot. In *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1321-1326, 1998.
- [10] 長阪, 稲葉, 井上. 体幹位置コンプライアンス制御を用いた人間型ロボットの歩行安定化. 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1999.
- [11] 水戸部, 矢島, 那須. ゼロモーメント点の操作による歩行ロボットの制御. *日本ロボット学会誌*, Vol. 18, No. 3, pp. 359-365, 2000.
- [12] 池田, 篠原, 美多. 可変拘束制御を用いた三次元脚式ロボットの走行制御. *日本ロボット学会誌*, Vol. 21, No. 1, pp. 94-102, 2003.
- [13] 空尾, 村上, 大西. インピーダンス制御による2足歩行ロボットの歩行制御. *電気学会論文集 D(産業応用部門誌)*, Vol. 117, No. 10, pp. 1227-1233, 1997.